

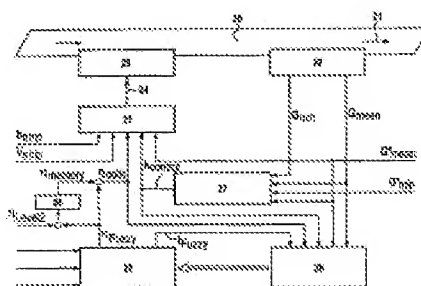


Verfahren und Einrichtung zum Beschichten eines Metallbandes**Publication number:** DE19707981**Publication date:** 1998-09-03**Inventor:** TAUTZ WILFRIED DR ING (DE); GOEPEL JOACHIM
DIPL ING (DE); WILKE ECKHARD DIPL ING (DE)**Applicant:** SIEMENS AG (DE)**Classification:****- International:** C25D7/06; C25D21/12; G05B13/02; C25D7/06;
C25D21/12; G05B13/02; (IPC1-7): C25D21/12;
C25D5/00; C25D7/06**- European:** C25D7/06C20; C25D21/12; G05B13/02C2**Application number:** DE19971007981 19970227**Priority number(s):** DE19971007981 19970227**Also published as:** WO9838355 (A3)
 WO9838355 (A2)[Report a data error here](#)**Abstract of DE19707981**

The invention relates to a method for coating a metal strip with metal, especially for coating a steel strip with zinc or a zinc-nickel compound by means of at least one current-carrying galvanic cell containing an electrolyte, through which the metal strip is lead, wherein the current causes a layer of metal coating to be deposited on the metal strip and the current, among other things, is regulated according to the properties of the galvanic cell in such a way that a layer corresponding to a desired thickness is deposited on the metal strip.





19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 197 07 981 A 1

51 Int. Cl.⁶:
C 25 D 21/12
C 25 D 5/00
C 25 D 7/06

21 Aktenzeichen: 197 07 981.4
22 Anmeldetag: 27. 2. 97
43 Offenlegungstag: 3. 9. 98

DE 197 07 981 A 1

71 Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

72 Erfinder:
Tautz, Wilfried, Dr.-Ing., 91301 Forchheim, DE;
Göpel, Joachim, Dipl.-Ing. (FH), 91094
Langensendelbach, DE; Wilke, Eckhard, Dipl.-Ing.,
91080 Marloffstein, DE

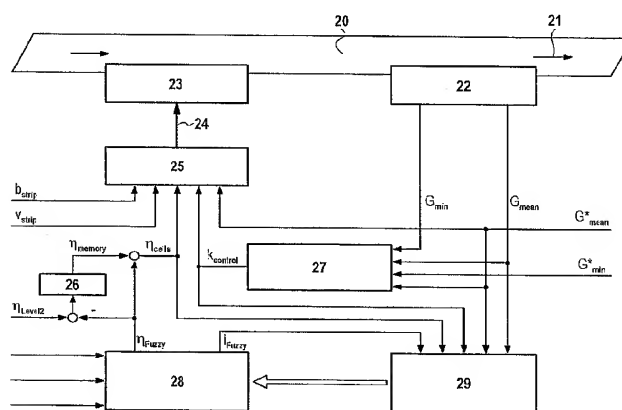
56 Entgegenhaltungen:
JP 07-2 52 698 A
JP 05-2 63 299 A
JP 05-2 26 541 A
JP 07-1 73 700
Japio Abstract zu JP 05-2 26 541 (A);
Derwent Abstract zu JP 05-2 26 541 (A);
Japio Abstract zu JP 07-1 73 700 (A);
Derwent Abstract zu JP 07-1 73 700 (A);
Japio Abstract zu JP 07-2 52 698 (A);
Derwent Abstract zu JP 07-2 52 698 (A);
Japio Abstract zu JP 05-2 63 299 (A);
Derwent Abstract zu 05-2 63 299 (A);

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren und Einrichtung zum Beschichten eines Metallbandes

57 Verfahren zum Beschichten eines Metallbandes mit einem Beschichtungsmetall, insbesondere zum Beschichten eines Stahlbandes mit Zink oder einer Zink-Nickel-Verbindung, mittels zumindest einer stromdurchflossenen galvanischen Zelle, die einen Elektrolyten enthält, durch den das Metallband hindurchgeführt wird, wobei der Strom eine Ablagerung einer Schicht von Beschichtungsmetall auf dem Metallband bewirkt, und wobei der Strom u. a. in Abhängigkeit der Eigenschaften der galvanischen Zelle derart eingestellt wird, daß sich eine Schicht einer gewünschten Solldicke auf dem Metallband ablagert.



DE 197 07 981 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren bzw. eine Einrichtung zum Beschichten eines Metallbandes mit einem Beschichtungsmetall, insbesondere zum Beschichten eines Stahlbandes mit Zink oder einer Zink-Nickel-Verbindung.

Eine Beschichtungsanlage weist üblicherweise eine oder mehrere Galvanisierungszellen auf, in denen sich ein Elektrolyt befindet, der die Metalle für die Beschichtung des Metallbandes enthält. Das Metallband wird durch die Elektrolytflüssigkeit hindurch geführt. Im Elektrolyten sind außerdem Anoden angeordnet. Durch einen elektrischen Strom zwischen den Anoden und dem als Kathode wirkenden Metallband wird das Metallband beschichtet. Dabei wird der Strom so eingestellt, daß sich eine Schicht einer gewünschten Solldicke auf dem Metallband ablagert.

Bei der industriellen Beschichtung von Metallbändern gibt es jedoch zwei sich widersprechende Forderungen. Zum einen soll ein vorgegebener Beschichtungssollwert möglichst nicht überschritten werden, da eine zu dicke Beschichtung unnötig viel Material verbraucht und zu höheren Kosten führt. Um jedoch die gewünschten Eigenschaften des Metallbandes garantieren zu können, muß sichergestellt sein, daß an keiner Stelle des Bandes eine bestimmte Mindestbeschichtung unterschritten wird.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren bzw. eine Einrichtung zur Beschichtung eines Metallbandes mit Beschichtungsmetall anzugeben, die es ermöglicht, einen vorgegebenen Beschichtungssollwert möglichst genau einzuhalten. Dabei soll insbesondere das Einhalten einer bestimmten Mindestbeschichtung garantiert werden, ohne daß es zu einer unnötig hohen Beschichtung des Metallbandes kommt.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 bzw. eine Einrichtung gemäß Anspruch 15 gelöst. Dabei wird der Strom durch die galvanische Zelle in Abhängigkeit der Eigenschaften der galvanischen Zelle derart eingestellt, daß sich eine Schicht einer gewünschten Solldicke auf dem Metallband ablagert, wobei die Eigenschaften der galvanischen Zelle mittels eines Fuzzy-Systems ermittelt werden. Durch Kenntnis der Eigenschaften, insbesondere durch Kenntnis des Wirkungsgrades der galvanischen Zelle, ist es möglich, einen vorgegebenen Beschichtungssollwert möglichst genau einzuhalten. Dabei hat sich ein Fuzzy-System als besonders geeignet erwiesen, die schwer zu ermittelnden und zeitlich schwankenden Eigenschaften, insbesondere den Wirkungsgrad einer galvanischen Zelle, zu ermitteln. Auf diese Weise können bei garantierter Mindestbeschichtung möglichst geringe Schichtdicken, d. h. Schichtdicken, die möglichst genau dem Beschichtungssollwert entsprechen, erreicht werden. Da bei der Metallbeschichtung im industriellen Maßstab das Beschichtungsmaterial ein nicht unerhebliche Kosten verursachender Faktor ist, führt das erfindungsgemäße Verfahren zu einem merkbar effektiveren Betrieb einer Beschichtungsanlage.

Eine Beschichtung in noch engeren Toleranzgrenzen, d. h. weitere Materialersparnis läßt sich dadurch erreichen, daß in vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung das Fuzzy-System, insbesondere durch Online-Training, an die Eigenschaften bzw. den Wirkungsgrad der galvanischen Zelle adaptiert wird. Damit wird es möglich, auf zeitliche Schwankungen, insbesondere des Wirkungsgrades der galvanischen Zelle, zu reagieren. Als besonders vorteilhaft hat sich jedoch das Online-Training des Fuzzy-Systems als Reaktion auf externe Ereignisse, wie z. B. die Verwendung eines neuen Metallbandes, eines neuen Beschichtungsmaterials oder einer anderen Sollschichtdicke, erwiesen.

Weitere Vorteile und erfinderische Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen, anhand der Zeichnungen und in Verbindung mit den Unteransprüchen. Im einzelnen zeigen:

Fig. 1 eine Beschichtungsanlage,

Fig. 2 eine erfindungsgemäße Beschichtungsregelung mit Fuzzy-System,

Fig. 3 die Struktur eines Monitorreglers,

Fig. 4 die Struktur eines erfindungsgemäßen Fuzzy-Systems,

Fig. 5 eine Kennlinie,

Fig. 6 Membership Functions für die Stromdichte,

Fig. 7 Membership Functions für den pH-Wert,

Fig. 8 Membership Functions für die Temperatur

Fig. 9 Fuzzy-Regeln,

Fig. 10 Fuzzy-Regeln,

Fig. 11 Struktur des Online-Trainings des Fuzzy-Systems.

Fig. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Beschichtungsanlage, in der gewalzte Stahlbänder **2** mit Zink oder Zink-Nickel beschichtet werden können. In der Beschichtungsanlage sind mehrere, z. B. **10**, Galvanisierungszellen vorhanden, in denen sich ein Elektrolyt **12** befindet, der die Metalle für die Beschichtung enthält. Für die Beschichtung mit Zink (Zn-Mode) wird ein anderer Elektrolyt verwendet als für die Beschichtung mit Zink-Nickel (ZnNi-Mode). Eine nicht gezeigte Elektrolytregelung sorgt dafür, daß die Zusammensetzung und die Parameter des jeweiligen Elektrolyten konstant bleiben, so daß stets eine gute Qualität der Galvanisierung sichergestellt ist.

Das Stahlband **2**, das beschichtet werden soll, wird durch Rollen **6, 7, 8, 9, 10** geführt und läuft mit einer bestimmten Geschwindigkeit in Richtung des mit Bezugszeichen **13** bezeichneten Pfeils durch die einzelnen Galvanisierungszellen **1**. In jeder Zelle sind je 4 Anoden **4, 5** angebracht, 2 Anoden **5** für die Oberseite und 2 Anoden **4** für die Unterseite des Bandes **2**. Die Stromrollen **8, 9** oberhalb der Zellen **1** übertragen den negativen Pol auf das Band, das auf diese Weise zur Kathode wird. Die Beschichtung des Bandes erfolgt elektrolytisch, indem in die Anoden **4, 5** mit Hilfe von Gleichrichtern ein bestimmter Strom eingeprägt wird. Dieser Strom bewirkt, daß das im Elektrolyten enthaltene Zink bzw. Zink-Nickel sich auf der Bandoberfläche ablagert.

Für die Anoden der Oberseite und der Unterseite des Bandes **2** werden die Ströme getrennt eingestellt. Dadurch lassen sich die Dicken der Beschichtungen für die Oberseite und die Unterseite separat festlegen. Ein Band **2** kann also nicht nur mit gleichen Dicken auf beiden Seiten beschichtet werden, sondern es ist auch möglich, durch unterschiedlich eingestellte Ströme die Oberseite und die Unterseite unabhängig voneinander mit verschiedenen Dicken zu beschichten.

Ebenso besteht die Möglichkeit, nur eine Seite des Bandes zu beschichten. In diesem Falle wird der ersten Galvanisierungszelle ein sogenannter Flash-Strom für die Seite zugeführt, die nicht beschichtet werden soll. So entsteht auf dieser Seite eine minimale Beschichtung, die so bemessen wird, daß sie in den übrigen Zellen gerade wieder durch die Säure des Elektrolyten abgebeizt wird. Auf diese Weise wird verhindert, daß die Säure des Elektrolyten aus der nicht beschichteten Seite des Bandes Eisen herauslöst.

Um die Beschichtungsanlage kontinuierlich betreiben zu können, werden die einzelnen Bänder vor der Anlage aneinandergeschweißt. Die dadurch entstehenden Schweißnähte werden verfolgt, so daß jederzeit bekannt ist, in welchem Teil der Anlage sich noch das alte Band befindet und wo bereits das neue Band anzutreffen ist. Hinter der Anlage werden die Bänder wieder getrennt. Jedes Band wird entweder

auf ein Coil gewickelt oder weiter unterteilt und auf mehrere Coils gewickelt.

Die Beschichtungsanlage soll auf die Oberseite und die Unterseite des Bandes jeweils eine Beschichtung mit einer genau festgelegten Dicke aufbringen. Diese Sollwerte sind möglichst genau einzuhalten. Insbesondere darf an keiner Stelle des Bandes eine bestimmte Minstdicke unterschritten werden, da sonst die geforderten Eigenschaften des Bandes nicht garantiert werden können. Andererseits ist eine zu große Dicke nicht erwünscht, weil sie unnötig Material verbraucht und zu höheren Kosten führt.

Für die Einhaltung dieser Vorgaben sorgt eine Beschichtungsregelung. Daher befindet sich in einem bestimmten Abstand hinter den Galvanisierungszellen **1** ein Beschichtungsmeßgerät **3**, das die Dicken der Beschichtungen der Oberseite und der Unterseite des Bandes **1** erfaßt. Ausgehend von diesen Meßwerten beeinflußt die Beschichtungsregelung die Beschichtung, indem sie für die Anoden **4**, **5** der Galvanisierungszellen **1** die erforderlichen Ströme berechnet, die dann als Stellgrößen den entsprechenden Gleichrichtern zugeführt werden.

Die Beschichtungsregelung regelt die Beschichtung der Oberseite und der Unterseite des Bandes **1** getrennt. Außerdem muß sie, wenn sich eine Schweißnaht in der Anlage befindet, das alte und das neue Band separat regeln. Daher muß die Beschichtungsregelung insgesamt viermal vorhanden sein.

Die Beschichtungsregelung hat die Aufgabe, die Ströme für die Anoden **4**, **5** der Galvanisierungszellen **1** fortlaufend so einzustellen, daß stets die gewünschte Beschichtung des Bandes **1** erreicht wird, und zwar unabhängig davon, welche Betriebsbedingungen gerade vorliegen. Die Menge an Zink bzw. Zink-Nickel, die aus dem Elektrolyten ausfällt und das Band **1** beschichtet, ist dem Produkt aus Strom und Zeit proportional. Die pro Zeit beschichtete Bandfläche ist das Produkt aus Bandbreite und Bandgeschwindigkeit. Will man also die Beschichtung, gemessen in g/m², berechnen, so müssen der Strom, die Bandbreite und die Bandgeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Die Beschichtungsregelung hat die umgekehrte Aufgabe, nämlich für einen vorgegebenen Beschichtungssollwert den erforderlichen Strom zu berechnen. Dies geschieht durch folgende Gleichung:

$$I_{\text{total}} = \frac{G^*_{\text{mean}} \cdot b_{\text{strip}} \cdot v_{\text{strip}} \cdot 60}{c_s \cdot \eta_{\text{cells}} \cdot k_{\text{control}}}$$

wobei

I_{total} der Gesamtstrom [A]

G^*_{mean} der Beschichtungssollwert [g/m²]

b_{strip} die Bandbreite [m]

v_{strip} die Bandgeschwindigkeit [m/min]

c_s das Ablagerungsäquivalent [g/Ah]

η_{cells} der Zellenwirkungsgrad

k_{control} der Stelleingriff der Regelung ist.

Die wesentlichen Einflußgrößen der Stromberechnung sind also der Beschichtungssollwert, die Bandbreite und die Bandgeschwindigkeit. Der Faktor 60 ergibt sich aus den verwendeten Einheiten durch die Umrechnung min/h. Das Ablagerungsäquivalent c_s beträgt für Zink 1,2193 g/Ah. Da die Säure des Elektrolyten in den Galvanisierungszellen einen Teil der Beschichtung wieder vom Band ablöst, ist die tatsächliche Beschichtung etwas geringer als die theoretisch berechnete. Dieser Effekt wird durch den Zellenwirkungsgrad η_{cells} berücksichtigt.

Die Beschichtungsregelung bestimmt diesen Zellenwir-

kungsgrad η_{cells} und adaptiert ihn mit Hilfe der Größe k_{control} an die aktuellen Betriebsbedingungen. Dabei dient k_{control} als Stelleingriff, um den Strom und damit die Beschichtung so einzustellen, daß der vorgegebene Beschichtungssollwert erreicht wird. Wie dies prinzipiell geschieht, zeigt Fig. 2.

Die Stromberechnung **25**, die mit den Größen G^*_{mean} , b_{strip} , v_{strip} , η_{cells} und k_{control} versorgt wird, stellt am Eingang der Beschichtungsanlage über den Strom die Beschichtung ein. Am Ausgang erfaßt ein Beschichtungsmeßgerät **22** die tatsächliche Beschichtung und stellt die Meßwerte G_{min} und G_{mean} zur Verfügung, wobei G_{min} die minimale Beschichtung und G_{mean} die mittlere Beschichtung ist.

Zu diesen Meßwerten gehören die folgenden Sollwerte:

G^*_{min} Mindestbeschichtung

G^*_{mean} Beschichtungssollwert.

Ausgehend von diesen Meßwerten und Sollwerten regelt die Beschichtungsregelung die Beschichtung und berechnet dazu den Stelleingriff k_{control} .

Bei der Erstellung des Regelkonzepts der Beschichtungsregelung hat sich herausgestellt, daß es zweckmäßig ist, eine Unterteilung in die folgenden 3 Komponenten vorzunehmen:

- Monitorregler **27**
- Fuzzy-System **28**
- Online-Training **29** des Fuzzy-Systems.

Der Monitorregler regelt die Beschichtung. Dazu wertet er die Meßwerte G_{min} und G_{mean} sowie die Sollwerte G^*_{min} und G^*_{mean} aus und berechnet daraus den Stelleingriff k_{control} . Dies erfolgt so, daß die Bedingungen

$$G_{\text{min}} \geq G^*_{\text{min}} \text{ und } G_{\text{mean}} = G^*_{\text{mean}}$$

möglichst gut eingehalten werden. Die erste Bedingung besagt, daß die Mindestbeschichtung nicht unterschritten werden darf. Die zweite Bedingung drückt aus, daß der vorgegebene Beschichtungssollwert einzuhalten ist.

Der Zellenwirkungsgrad η_{cells} hängt von den jeweiligen Betriebsbedingungen der Anlage ab. Die zu dessen Berechnung berücksichtigten Größen sind hierbei:

- Stromdichte der Anoden
- pH-Wert des Elektrolyten
- Temperatur des Elektrolyten.

Diese 3 Größen werden als Eingangsgrößen eines Fuzzy-Systems **28** verwendet, das an seinem ersten Ausgang den Zellenwirkungsgrad η_{Fuzzy} bereitstellt. Auch die übergeordnete Automatisierungsebene, die in Fig. 2 nicht dargestellt ist, berechnet für jedes Band einen Zellenwirkungsgrad, der mit η_{Level2} bezeichnet wird. Bei jedem Bandanfang wird die Differenz dieser beiden Zellenwirkungsgrade

$$\eta_{\text{memory}} = \eta_{\text{Level2}} - \eta_{\text{Fuzzy}}$$

gespeichert und anschließend bei der Beschichtung des Bandes zum Zellenwirkungsgrad des Fuzzy-Systems addiert:

$$\eta_{\text{cells}} = \eta_{\text{memory}} + \eta_{\text{Fuzzy}}$$

Auf diese Weise wird erreicht, daß jedes Band mit dem vom übergeordneten Automatisierungssystem vorgegebenen Zellenwirkungsgrad $\eta_{\text{cells}} = \eta_{\text{Level2}}$ startet und danach das Fuzzy-System **28** diesen Zellenwirkungsgrad η_{cells} ändern kann.

Das Fuzzy-System **28** wird zu Beginn mit einfachem ver-

bal formulierten Expertenwissen vorbesetzt.

Das Online-Training **29** sorgt beim Betrieb der Anlage für eine automatische Adaption des Fuzzy-Systems **28** an das tatsächliche Anlagenverhalten. Dazu wird dem Online-Training **29** die aktuelle Situation im vorliegenden Beispiel in Form der Größe i_{Fuzzy} des Fuzzy-Systems **28** zugeführt. Außerdem wird der aktuelle in der Stromberechnung verwendete Zellenwirkungsgrad berücksichtigt. Dieser ist durch die Größen η_{cells} und k_{control} gekennzeichnet, die dem Online-Training **29** ebenfalls zugeführt werden. Um das Beschichtungsverhalten der Anlage beurteilen zu können, werden dem Online-Training noch der Beschichtungssollwert G_{mean}^* und die gemessenen Beschichtung G_{mean} zugeführt.

Aus all diesen Größen wird der tatsächliche Zellenwirkungsgrad der Anlage berechnet. Dieser wird herangezogen, um das Fuzzy-System schrittweise zu adaptieren, so daß es das tatsächliche Anlagenverhalten immer besser repräsentiert. Dadurch ist das Fuzzy-System in der Lage, stets einen optimalen Zellenwirkungsgrad zu bestimmen.

In Behandlungslinien kommt es häufig zu dem Problem, daß die technologisch relevanten Größen, die im Behandlungsprozeß beeinflußt werden, nicht an dieser Stelle, sondern bedingt durch die Anordnung des Meßgerätes erst in einer größeren Entfernung gemessen werden. Um diese technologischen Größen zu regeln, werden sogenannte Monitorregler eingesetzt. Dabei ist das Problem die relativ große Totzeit vom Stelleingriff im Behandlungsprozeß bis zu dessen Auswirkung im Meßgerät.

Der vorliegende Beschichtungsprozeß erstreckt sich von den Galvanisierungszellen bis zum Beschichtungsmeßgerät **22**. In den Galvanisierungszellen wird das durchlaufende Band **20** beschichtet. Der Monitorregler **27** beeinflusst die Beschichtung durch Stelleingriffe, die in der Stromberechnung umgesetzt werden. Die Auswirkungen dieser Stelleingriffe werden jedoch erst registriert, wenn der betreffende Bandabschnitt bis zum Meßgerät transportiert worden ist. Je nach Anordnung des Meßgerätes und abhängig von der Bandgeschwindigkeit können sich relativ große Transportzeiten ergeben. Diese sind charakteristisch für Monitorregelungen. Der verwendete Monitorregler **27** ist so ausgelegt, daß er auch bei großen Transportzeiten eine gute Regeldynamik besitzt. Seine Struktur zeigt **Fig. 3**.

Das Band **30** läuft in Richtung des Pfeils **33** durch die Beschichtungsanlage. Das Beschichtungsmeßgerät **31** erfaßt die tatsächliche Beschichtung und stellt die Meßwerte G_{min} und G_{mean} bereit.

Der Monitorregler legt die Stelleingriffe k_{control} fest, die in der Stromberechnung verwendet werden. Parallel zur Beschichtungsanlage arbeitet ein Anlagenmodell **38**. Dieses wird an seinem Eingang mit dem Quotienten

$$\frac{G_{\text{mean}}^*}{k_{\text{control}}}$$

versorgt. Dieser Quotient ist auch in der Stromberechnung enthalten. Er ist ein Maß für die momentan aufgebrachte Beschichtung.

Das Anlagenmodell bildet das Verhalten der Beschichtungsanlage nach. Es berechnet fortlaufend die in den Galvanisierungszellen aufgebrachte Beschichtung des Bandes und verfolgt diese bis zum Beschichtungsmeßgerät. Am Ausgang des Anlagenmodells wird dann die Beschichtung G_{M} ausgegeben.

Durch das Anlagenmodell **38** werden die beiden Beschichtungen G_{mean} und G_{M} synchronisiert, so daß sie in Beziehung zueinander gesetzt werden können. Wenn der in der Stromberechnung verwendete Zellenwirkungsgrad kor-

rekt ist, dann gilt $G_{\text{mean}} = G_{\text{M}}$. Ansonsten muß der Zellenwirkungsgrad mit

$$k_{\text{mean}} = \frac{G_{\text{mean}}}{G_{\text{M}}}$$

korrigiert werden. Dieser Wert k_{mean} könnte im Prinzip direkt als Stellgröße k_{control} ausgegeben werden. Es ist jedoch besonders vorteilhaft, eine sogenannte dynamische Glättung vorzunehmen, was durch den dynamischen Tiefpaß **39** geschieht. Dessen Ausgangsgröße k_{LP1} ist die Stellgröße, die zur Regelung der mittleren Beschichtung G_{mean} notwendig ist, um $G_{\text{mean}} = G_{\text{mean}}^*$ zu erreichen.

Vom Beschichtungsmeßgerät kommt noch ein weiterer Meßwert, nämlich die minimale Beschichtung G_{min} . Mit diesem Meßwert wird genauso verfahren wie mit der mittleren Beschichtung G_{mean} . Es wird also der Wert

$$k_{\text{min}} = \frac{G_{\text{min}}}{G_{\text{M}}}$$

berechnet und in besonders vorteilhafter Weise mit dem dynamischen Tiefpaß **40** geglättet. Dessen Ausgangsgröße k_{LP2} wird noch mit G_{mean}^* multipliziert und durch G_{min}^* dividiert, damit der Meßwert G_{min} nicht mit dem Sollwert G_{mean}^* , der in G_{M} enthalten ist, sondern mit G_{min}^* verglichen wird:

$$k_{\text{LP2}} \cdot \frac{G_{\text{mean}}^*}{G_{\text{min}}^*}$$

Dieser Wert ist die Stellgröße, die zur Regelung der minimalen Beschichtung G_{min} notwendig ist, um $G_{\text{min}} = G_{\text{min}}^*$ zu erreichen.

Das Minimum dieser Stellgröße und der oben genannten Stellgröße k_{LP1} die Stellgröße k die der Monitorregler ausgibt:

$$k_{\text{control}} = \min \left(k_{\text{LP1}}, k_{\text{LP2}} \cdot \frac{G_{\text{mean}}^*}{G_{\text{min}}^*} \right)$$

Der Monitorregler regelt also sowohl die mittlere Beschichtung G_{mean} als auch die minimale Beschichtung G_{min} . Er enthält somit zwei Regelungen. Von den beiden Stellgrößen wird die kleinere ausgegeben, da diese zu einer höheren Beschichtung führt. Dadurch wird erreicht, daß der Monitorregler im Normalfall die mittlere Beschichtung regelt, um $G_{\text{mean}} = G_{\text{mean}}^*$ zu erreichen. Wenn dabei jedoch die minimale Beschichtung unterhalb der Mindestbeschichtung liegen würde, dann regelt der Monitorregler die minimale Beschichtung, um $G_{\text{min}} = G_{\text{min}}^*$ zu erreichen. Dabei wird allerdings $G_{\text{mean}} > G_{\text{mean}}^*$.

Das Anlagenmodell **38** bildet das Verhalten der Beschichtungsanlage nach. Es besteht aus den folgenden drei Teilmodellen:

- Beschichtungsmodell **35**
- Transportmodell **36**
- Mittelwertbildung **37**.

Das Beschichtungsmodell berechnet die in den Galvanisierungszellen aufgebrachte Beschichtung des Bandes. Es enthält einen Beschichtungsspeicher, der dem Band zugeordnet ist, das sich in den Galvanisierungszellen befindet.

Dieses Band wird gedanklich in gleich große Segmente unterteilt. Die Anzahl der Segmente sei nC . Dann besteht auch der Beschichtungsspeicher aus nC Speicherzellen. Damit ist jede Speicherzelle genau einem Bandsegment zugeordnet.

Für jede Speicherzelle x_{Ci} ist ein Beschichtungseinfluß w_{Ci} zu parametrieren, wobei für die Summe

$$\sum_{i=1}^{nC} w_{Ci} = 1$$

gelten muß. Diese Beschichtungseinflüsse geben an, an welchen Stellen in den Galvanisierungszellen die Beschichtung erfolgt. Für die Speicherzellen bzw. Bandsegmente, die sich gegenüber einer Anode befinden, sollten Beschichtungseinflüsse $w_{Ci} > 0$ parametrieren werden, während die übrigen Werte $w_{Ci} = 0$ gesetzt werden.

Immer wenn das Band wieder um 1 Bandsegment weitertransportiert worden ist, arbeitet das Beschichtungsmodell. Das bedeutet, daß für jedes Bandsegment eine neue Beschichtung berechnet und in der entsprechenden Speicherzelle des Beschichtungsspeichers abgelegt wird. Für das 1. Bandsegment ergibt sich dabei die neue Beschichtung, indem w_{C1} mit der Eingangsgröße EINGANG multipliziert wird. Für die anderen Bandsegmente ergibt sich die neue Beschichtung aus der bereits vorhandenen, die sich in der Speicherzelle davor befindet, indem die mit w_{Ci} multiplizierte Eingangsgröße hinzuaddiert wird. Um noch benötigte Inhalte der Speicherzellen nicht zu überschreiben, werden die Berechnungen in umgekehrter Reihenfolge, beginnend mit dem letzten Bandsegment, durchgeführt:

$$x_{Ci} = x_{Ci-1} + w_{Ci} \cdot \text{EINGANG} \quad i = nC, nC-1, \dots, 2$$

$$x_{C1} = w_{C1} \cdot \text{EINGANG}.$$

So erhöht sich im Beschichtungsmodell Schritt für Schritt die Beschichtung in gleicher Weise wie auf dem Band, das durch die Galvanisierungszellen läuft. Der Inhalt der letzten Speicherzelle ist dann die insgesamt aufgebrauchte Beschichtung, die als Ausgangsgröße ausgegeben wird.

Das Transportmodell verfolgt die Beschichtung des Bandes von den Galvanisierungszellen bis zum Beschichtungsmeßgerät. Es enthält einen Transportspeicher, der dem Band zugeordnet ist, das sich zwischen den Galvanisierungszellen und dem Beschichtungsmeßgerät befindet. Dieses Band wird wieder gedanklich in gleich große Segmente unterteilt. Die Anzahl der Segmente sei nT . Dann besteht der Transportspeicher aus $nT + 1$ Speicherzellen.

Die Zahl der Speicherzellen ist um 1 größer als die Zahl der Bandsegmente, damit das Transportmodell auch mit $nT = 0$ arbeiten kann. In diesem Falle stellt das Transportmodell einen direkten Durchgriff dar, was z. B. notwendig wäre, wenn das Beschichtungsmeßgerät unmittelbar hinter den Galvanisierungszellen angebracht wäre.

Der Transportspeicher hat die Funktion eines FIFO-Speichers. Er ist als Ringspeicher ausgelegt. Immer wenn das Band wieder um 1 Bandsegment weitertransportiert worden ist, arbeitet das Transportmodell. Das bedeutet, daß zunächst der am Eingang anliegende Wert in der obersten Speicherzelle abgelegt wird. Anschließend dreht sich der ringförmige Transportspeicher in Pfeilrichtung um 1 Speicherzelle weiter. Dann wird der Wert aus der obersten Speicherzelle am Ausgang ausgegeben. Die Laufzeit durch das Transportmodell ändert sich mit der Bandgeschwindigkeit und ist immer identisch mit der Laufzeit des Bandes durch die Anlage. Damit ist die Ausgangsgröße des Transportmodells stets diejenige Beschichtung, die gerade im Beschichtungsmeßgerät erfaßt wird. Das Beschichtungsmeßgerät

führt jeweils über eine bestimmte Zeit eine Mittelung durch und berechnet die mittlere Beschichtung G_{mean} . In gleicher Weise arbeitet die Mittelwertbildung. Sie gibt den berechneten Mittelwert G_M am Ausgang des Anlagenmodells aus.

Wie bereits ausgeführt, enthält der Monitorregler zwei Regelungen, eine für die mittlere Beschichtung G_{mean} und eine zweite für die minimale Beschichtung G_{min} . Die Dynamik der ersten Regelung wird durch den dynamischen Tiefpaß 39 und die Dynamik der zweiten Regelung durch den dynamischen Tiefpaß 40 eingestellt. Diese beiden dynamischen Tiefpässe erfüllen folgende Funktionen:

- Fehler und Rauschen der Meßwerte werden geglättet.
- Im allgemeinen stimmt das Verhalten des Anlagenmodells nicht exakt mit dem Verhalten der Beschichtungsanlage überein. Insbesondere können sich leicht Ungenauigkeiten in der Transportzeit ergeben. Wenn sich dann die Beschichtung ändert, ändern sich die Größen G_{mean} und G_{min} einerseits und die Größe G_M andererseits nicht synchron. Dadurch treten Impulse in den Größen k_{mean} und k_{min} auf. Diese Impulse werden durch die Tiefpässe geglättet und damit verkleinert.
- Änderungen der Stellgröße k_{control} erfolgen geglättet.

Der dynamische Tiefpaß 39 wird durch die Glättungszahl n_{LP1} parametrieren. Diese Glättungszahl entspricht einer Zeitkonstanten. Sie gibt an, über wieviel Meßwerte die Glättung sich erstreckt. Wenn z. B. das Beschichtungsmeßgerät jeweils nach 1 min neue Meßwerte liefert und $n_{LP1} = 3$ ist, so arbeitet der Tiefpaß mit einer Zeitkonstanten von 3 min.

Bei einem einfachen Tiefpaß wäre die parametrieren Glättungszahl n_{LP1} von Anfang an jederzeit wirksam. Demgegenüber arbeitet der hier eingesetzte dynamische Tiefpaß 39 so, daß er bei jedem Bandanfang zunächst einen direkten Durchgriff zuläßt. Danach wird eine Glättungszahl verwendet, die langsam von 1 auf n_{LP1} ansteigt. Dieser Anstieg wird durch einen weiteren Tiefpaß mit der Glättungszahl n_{LP1} realisiert.

Das bedeutet, daß bei jedem Bandanfang, sobald die ersten Meßwerte eingetroffen sind, wegen des direkten Durchgriffs $k_{LP1} = k_{\text{mean}}$ ist. Dadurch wird erreicht, daß der Monitorregler am Bandanfang so schnell wie überhaupt möglich, also ohne irgendeine Glättung, den vorgegebenen Beschichtungssollwert einstellt. Danach erhöht sich langsam die Glättungswirkung des Tiefpasses.

Der dynamische Tiefpaß 40 wird durch die folgenden Werte parametrieren:

- $n_{LP2 \text{ down}}$ Glättungszahl abwärts
- $n_{LP2 \text{ up}}$ Glättungszahl aufwärts
- $n_{LP2 \text{ wait}}$ Wartezeit nach einer Abwärtsbewegung, bis wieder eine Aufwärtsbewegung möglich ist.

Die Glättungszahl abwärts $n_{LP2 \text{ down}}$ wird verwendet, wenn die Ausgangsgröße k_{LP2} des Tiefpasses kleiner wird. Dies ist z. B. dann gegeben, wenn die minimale Beschichtung G_{min} plötzlich die Mindestbeschichtung G_{min}^* unterschreitet. Damit in diesem Falle k_{LP2} und damit k_{control} schnell verkleinert wird, wodurch die Beschichtung sich erhöht, sollte die Glättungszahl abwärts $n_{LP2 \text{ down}}$ relativ klein gewählt werden.

Die Glättungszahl aufwärts $n_{LP2 \text{ up}}$ wird verwendet, wenn die Ausgangsgröße k_{LP2} des Tiefpasses größer wird. Diese Glättungszahl kann so parametrieren werden, daß eine ausreichende Glättung erreicht wird.

Damit bei einer Erhöhung des Meßwertes G_{min} nicht sofort wieder die Beschichtung verringert wird, sorgt die Wartezeit $n_{LP2 \text{ wait}}$ dafür, daß dies erst dann geschieht, nachdem

weitere $n_{LP2 \text{ wait}}$ Meßwerte eingetroffen sind.

Eine wesentliche Eigenschaft des Monitorreglers ist, daß er ohne bleibende Regelabweichung arbeitet, was sich durch folgende Überlegung nachvollziehen läßt. Es wird zunächst davon ausgegangen, daß

$$k_{\text{control}} = k_1$$

ist. Dann gibt das Anlagenmodell den Wert

$$G_M = \frac{G_{\text{mean}}^*}{k_1}$$

aus. Wenn nun in der Anlage die Beschichtung

$$G_{\text{mean}} = k_2 \cdot G_{\text{mean}}^*$$

gemessen wird, so wird im Monitorregler der Wert

$$k_{\text{mean}} = \frac{G_{\text{mean}}}{G_M} = k_1 \cdot k_2$$

berechnet, der nach dem Einschwingen des dynamischen Tiefpasses als Stellgröße

$$k_{\text{control}} = k_1 \cdot k_2$$

ausgegeben wird. k_{control} wird also gegenüber dem ursprünglichen Wert mit dem Faktor k_2 multipliziert. Dadurch verringern sich sowohl die Beschichtung in den Galvanisierungszellen der Anlage als auch die Eingangsgröße des Anlagenmodells um den Faktor k_2 . Nach dem Transport des Bandes durch die Anlage erfaßt das Beschichtungsmeßgerät diese Verringerung und stellt den Meßwert

$$G_{\text{mean}} = G_{\text{mean}}^*$$

zur Verfügung. Gleichzeitig gibt auch das Anlagenmodell den verringerten Wert

$$G_M = \frac{G_{\text{mean}}^*}{k_1 \cdot k_2}$$

aus. Damit wird weiterhin der Wert

$$k_{\text{mean}} = \frac{G_{\text{mean}}}{G_M} = k_1 \cdot k_2$$

berechnet und als Stellgröße

$$k_{\text{control}} = k_1 \cdot k_2$$

ausgegeben. Der Monitorregler regelt also Abweichungen vom Sollwert ohne bleibende Regelabweichung aus. Er besitzt somit ein integrierendes Verhalten. Dabei verwendet er gewissermaßen das Anlagenmodell als Speicher für die bisherigen Stelleingriffe, um davon ausgehend neue Stelleingriffe zu berechnen.

Des weiteren ist der hier vorgestellte Monitorregler durch folgende Eigenschaften und Vorteile gegenüber konventionellen Reglern gekennzeichnet:

- Am Bandanfang werden Abweichungen vom Sollwert so schnell wie überhaupt möglich, also ohne ir-

gendeine Glättung, ausgeregelt. Danach setzt langsam die Glättungswirkung der dynamischen Tiefpässe ein.

– Würde als Monitorregler ein einfacher I-Regler verwendet werden, so könnte dieser wegen der Transportzeit in der Beschichtungsanlage nur sehr langsam eingestellt werden. Je größer die Transportzeit ist, desto langsamer müßte ein I-Regler eingestellt sein. Diesen Nachteil vermeidet der hier vorgestellte Monitorregler. Dessen Dynamik kann unabhängig von der Transportzeit beliebig festgelegt werden, also z. B. nach technologischen Aspekten.

– Durch das im Monitorregler enthaltene Anlagenmodell ergibt sich, daß die berechneten Werte k_{mean} und k_{min} nicht von der ausgegebenen Stellgröße k_{control} abhängen, da k_{control} in gleicher Weise die Meßwerte G_{mean} und G_{min} und die Größe G_M beeinflusst und sich diese Einflüsse kompensieren. Damit ist die Stabilität der Monitorregelung sichergestellt. Dies gilt unabhängig davon, wie die Dynamik des Monitorreglers durch die dynamischen Tiefpässe 1 und 2 eingestellt ist.

– Änderungen des Sollwertes G_{mean}^* werden unmittelbar ohne Zeitverzögerung umgesetzt, da sie direkt in die Stromberechnung eingehen. Parallel dazu liegen sie auch am Eingang des Anlagenmodells an. Dadurch beeinflussen sie gleichermaßen die Werte G_{mean} , G_{min} und G_M , so daß auch hier wieder die Werte k_{mean} und k_{min} nicht beeinflusst werden. Das bedeutet, daß bei Sollwertänderungen keinerlei Einschwingvorgänge auftreten. Dies gilt auch, wenn die Mindestbeschichtung G_{min}^* geändert wird.

Das Fuzzy-System hat die Aufgabe, während das Band in den Galvanisierungszellen beschichtet wird, fortlaufend den Zellenwirkungsgrad zu bestimmen. Dieser wird unmittelbar in der Stromberechnung verwendet. Dadurch wirken sich Änderungen des Zellenwirkungsgrades sofort auf die Beschichtung aus, und es muß nicht erst gewartet werden, bis das Beschichtungsmeßgerät eine Abweichung vom Sollwert feststellt, die dann vom Monitorregler ausgeregelt werden müßte. Wenn das Fuzzy-System korrekt arbeitet und die Stromversorgung mit dem Zellenwirkungsgrad versorgt, der tatsächlich in der Anlage vorhanden ist, dann stimmt die auf das Band aufgebrachte Beschichtung mit dem Beschichtungssollwert überein, und der Monitorregler muß nicht eingreifen. Das Fuzzy-System stellt also eine Vorsteuerung dar und entlastet auf diese Weise den Monitorregler.

Beim Betrieb der Anlage sorgt das Online-Training dafür, daß das Fuzzy-System automatisch an das tatsächliche Anlagenverhalten adaptiert wird. Das Fuzzy-System muß also online modifiziert werden können. Damit dies auf einfache Weise möglich ist, wird es aus 2 Komponenten aufgebaut, wie es in **Fig. 4** gezeigt ist.

Das Fuzzy-System besteht in vorteilhafter Ausgestaltung, wie sie in **Fig. 4** gezeigt ist, aus dem Fuzzy-Kern **50** und einer nachgeschalteten Kennlinie **51**, wie sie **Fig. 5** zeigt. Der Fuzzy-Kern **50** in **Fig. 4** beinhaltet die Fuzzifizierung, die Inferenz (Abarbeitung der Regeln) und die Defuzzifizierung, er ist also das eigentliche Fuzzy-Element. An seinem Ausgang steht allerdings nicht der Zellenwirkungsgrad zur Verfügung, sondern der Fuzzy-Index i_{Fuzzy} .

Dieser Fuzzy-Index i_{Fuzzy} liegt im Bereich 1...6, muß aber nicht unbedingt ganzzahlig sein. Er wird als Eingangsgröße auf die Kennlinie **51** gegeben, und am Ausgang ergibt sich dann der zu bestimmende Zellenwirkungsgrad η_{Fuzzy} . Die Kennlinie wird durch die Werte $\eta_1 \dots \eta_2$ parametrisiert. Der Fuzzy-Index i_{Fuzzy} stellt also gewissermaßen den Index dar, um aus dem Bereich $\eta_1 \dots \eta_6$ den Zellenwirkungsgrad η_{Fuzzy} zu bestimmen.

Der beschriebene Aufbau aus zwei Komponenten hat den besonderen Vorteil, daß das Fuzzy-System modifiziert werden kann, indem lediglich die Kennlinie geändert wird. Dabei wird in den eigentlichen Fuzzy-Kern nicht eingegriffen. Das Online-Training nutzt diesen Vorteil. Es adaptiert das Fuzzy-System, indem es die Parameter $\eta_1 \dots \eta_6$ der Kennlinie verändert.

Die Größen Stromdichte **52** der Anoden, pH-Wert **53** des Elektrolyten, Temperatur **54** des Elektrolyten werden als Eingangsgrößen des Fuzzy-Systems verwendet. Ihr Einfluß auf den Zellenwirkungsgrad läßt sich durch verbal formuliertes Expertenwissen z. B. wie folgt beschreiben:

- Eine höhere Stromdichte führt zu einem höheren Zellenwirkungsgrad.
- Ein höherer pH-Wert führt zu einem höheren Zellenwirkungsgrad.
- Eine höhere Temperatur führt zu einem geringeren Zellenwirkungsgrad.
- Bei der Beschichtung mit Zink (Zn-Mode) liegt der Zellenwirkungsgrad etwa im Bereich 0,93. . 0,98.
- Bei der Beschichtung mit Zink-Nickel (ZnNi-Mode) liegt der Zellenwirkungsgrad etwa im Bereich 0,78. . 0,91.

Eine höhere Temperatur hat zur Folge, daß die Säure des Elektrolyten in den Galvanisierungszellen einen größeren Teil der bereits aufgetragenen Beschichtung wieder vom Band ablöst. Das führt zu einem geringeren Zellenwirkungsgrad. Im Vergleich zu den beiden anderen Eingangsgrößen hat aber die Temperatur den geringsten Einfluß. Hinzu kommt noch, daß die Temperatur meistens im Normalbereich liegt und sich nur sehr wenig ändert, da sie geregelt und gut konstant gehalten wird. Lediglich beim Anfahren der Anlage können etwas niedrigere Temperaturen auftreten.

Die Stromdichte **52** und der pH-Wert **53** beeinflussen den Zellenwirkungsgrad stärker als die Temperatur **54**. Daher werden der Stromdichte und dem pH-Wert jeweils drei und der Temperatur nur zwei Membership-Funktionen zugeordnet. Wie die Membership-Funktionen beispielsweise aussehen können und welche linguistischen Werte beispielsweise verwendet werden können, zeigen **Fig. 6** bis **Fig. 8**. Dabei zeigt **Fig. 6** die Membershipfunktionen der Stromdichte **I**, **Fig. 7** die Membershipfunktionen des pH-Wertes **W_{pH}** und **Fig. 8** die Membershipfunktion der Temperatur **T**. Die dreieckförmigen Membership-Funktionen werden parametrisiert, indem ihre Fußpunkte folgendermaßen festgelegt werden:

J_1 untere Bereichsgrenze der Stromdichte
 J_2 mittlerer Fußpunkt der Stromdichte
 J_3 obere Bereichsgrenze der Stromdichte
 pH_1 untere Bereichsgrenze des pH-Wertes
 pH_2 mittlerer Fußpunkt des pH-Wertes
 pH_3 obere Bereichsgrenze des pH-Wertes
 T_1 untere Bereichsgrenze der Temperatur
 T_2 obere Bereichsgrenze der Temperatur.

Bei dieser Parametrierung werden die Bereichsgrenzen jeder Eingangsgröße als äußere Fußpunkte verwendet. Folglich überdecken die Membership-Funktionen gerade eben den relevanten Bereich der betreffenden Eingangsgröße. Dadurch wird erreicht, daß das Fuzzy-System optimal an die Eingangsgrößen angepaßt ist, so daß es auf alle Änderungen der Eingangsgrößen bestmöglich reagieren kann.

Die ersten drei Aussagen des angegebenen Expertenwissens beschreiben den Einfluß der Eingangsgrößen auf den Zellenwirkungsgrad. Davon ausgehend werden nun die Regeln des Fuzzy-Kerns aufgestellt. Dabei werden für die Ausgangsgröße i_{Fuzzy} die Singletons 1, 2, 3, 4, 5 und 6 verwen-

det, so daß i_{Fuzzy} immer im Bereich 1. . 6 liegt. Die Regeln können **Fig. 9** und **Fig. 10** entnommen werden, wobei **Fig. 9** die Regeln für kleine Temperaturen ($T = S$) und **Fig. 10** die Regeln für mittlere Temperaturen ($T = M$) offenbart. Sie sind dort in Matrixform dargestellt. Für jede Kombination der linguistischen Werte der Eingangsgrößen existiert genau eine Regel. Insgesamt gibt es 18 Kombinationen, also 18 Regeln. Für jede Regel ist der zugehörige Singleton der Ausgangsgröße angegeben. Beispielsweise kann folgende Regel abgelesen werden:

Wenn die Stromdichte = S
 und der pH-Wert = B
 und die Temperatur = M
 dann ist $i_{\text{Fuzzy}} = 3$.

Wäre diese Regel als einzige wirksam, so wäre $i_{\text{Fuzzy}} = 3$ und damit gemäß der Kennlinie $\eta_{\text{Fuzzy}} = \eta_3$.

Die letzten zwei Aussagen des angegebenen Expertenwissens geben den jeweiligen Bereich des Zellenwirkungsgrades an. Sie werden herangezogen, um die Kennlinie zu parametrieren. Dabei werden η_1 und η_6 so gewählt, daß die Kennlinie sich genau über den angegebenen Bereich erstreckt. Die Werte η_1 und η_6 werden also gleich den Bereichsgrenzen gesetzt. Die Werte $\eta_2 \dots \eta_5$ werden dazwischen äquidistant verteilt. Damit ergeben sich folgende Parameter der Kennlinie:

Zn-Mode: $\eta_1 = 0,93$

$\eta_2 = 0,94$

$\eta_3 = 0,95$

$\eta_4 = 0,96$

$\eta_5 = 0,97$

$\eta_6 = 0,98$

ZnNi-Mode: $\eta_1 = 0,78$

$\eta_2 = 0,806$

$\eta_3 = 0,832$

$\eta_4 = 0,858$

$\eta_5 = 0,884$

$\eta_6 = 0,91$. Diese Parameter der Kennlinie sind lediglich als Startwerte anzusehen. Die genauen Parameter berechnet das Online-Training beim Betrieb der Anlage.

Das Online-Training wie in **Fig. 2** dargestellt wird mit folgenden Größen versorgt:

i_{Fuzzy} Fuzzy-Index

η_{cells} Zellenwirkungsgrad

k_{control} Stelleingriff der Regelung

G^*_{mean} Beschichtungssollwert

G_{mean} mittlere Beschichtung.

Ausgehend davon berechnet es die Parameter $\eta_1 \dots \eta_6$ der Kennlinie.

Wie im Monitorregler arbeitet auch hier im Online-Training ein Anlagenmodell **60**, das ein Beschichtungsmodell **61**, ein Transportmodell **62** und eine Mittelwertbildung **63** aufweist, parallel zur Beschichtungsanlage. An seinem Eingang liegt der Wert

$$\frac{G^*_{\text{mean}}}{\eta_{\text{cells}} \cdot k_{\text{control}}}$$

an. Dieser Wert ist auch in der Stromberechnung enthalten. Er ist ein Maß für die momentan aufgetragene Beschichtung, dividiert durch den Zellenwirkungsgrad.

Das Anlagenmodell **60** bildet wieder das Verhalten der Beschichtungsanlage nach. Es berechnet fortlaufend die in den Galvanisierungszellen aufgetragene Beschichtung des Bandes und verfolgt diese bis zum Beschichtungsmeßgerät. Am Ausgang des Anlagenmodells **60** wird dann die Größe G_{OL} ausgegeben. Sie ist die erwartete Beschichtung, also G^*_{mean} dividiert durch den zugehörigen Zellenwirkungs-

grad.

Gleichzeitig stellt das Beschichtungsmeßgerät die tatsächliche Beschichtung G_{mean} bereit. Durch das Anlagenmodell werden die Größe G_{OL} und die Beschichtung G_{mean} synchronisiert, so daß sie in Beziehung zueinander gesetzt werden können. So ergibt sich der tatsächliche Zellenwirkungsgrad der Anlage wie folgt:

$$\eta_{\text{OL}} = \frac{G_{\text{mean}}}{G_{\text{OL}}}$$

Die beiden nachfolgenden Überlegungen verdeutlichen die Wirkungsweise dieser Gleichung:

- Wenn $G_{\text{mean}} = G_{\text{mean}}^*$ ist, dann hat die Stromberechnung bei der Beschichtung den korrekten Zellenwirkungsgrad verwendet. Dieser korrekte Zellenwirkungsgrad ist in G_{OL} enthalten. Damit ergibt sich ein η_{OL} das gleich diesem in G_{OL} enthaltenen korrekten Zellenwirkungsgrad ist.
- Wenn dagegen $G_{\text{mean}} > G_{\text{mean}}^*$ ist, dann ist der tatsächliche Zellenwirkungsgrad größer als derjenige, den die Stromberechnung bei der Beschichtung verwendet hat und der in G_{OL} enthalten ist. Als Folge davon wird ein entsprechend größeres η_{OL} berechnet. Wenn andererseits $G_{\text{mean}} < G_{\text{mean}}^*$ ist, wird ein kleineres η_{OL} berechnet.

Parallel zur Beschichtungsanlage arbeitet ein weiteres Modell, nämlich das Fuzzy-Index-Modell **68**. Seinem Eingang wird der Fuzzy-Index i_{Fuzzy} zugeführt. Er gibt an, welche Stelle der Kennlinie für die momentan aufgebrauchte Beschichtung relevant ist. Das Fuzzy-Index-Modell **68** verfolgt den Fuzzy-Index von den Galvanisierungszellen bis zum Beschichtungsmeßgerät und berechnet einen Mittelwert in gleicher Weise wie das Beschichtungsmeßgerät. An seinem Ausgang wird dann dieser Mittelwert als Fuzzy-Index i_{OL} ausgegeben.

Das Fuzzy-Index-Modell **68** synchronisiert den Fuzzy-Index i_{OL} mit der Größe G_{OL} und der Beschichtung G_{mean} und folglich auch mit dem Zellenwirkungsgrad η_{OL} . Damit kennzeichnet der Fuzzy-Index i_{OL} die Stelle der Kennlinie, für die der tatsächliche Zellenwirkungsgrad η_{OL} berechnet worden ist. Auf dieser Basis adaptiert dann der Lernalgorithmus die Kennlinie, indem er die Parameter $\eta_1 \dots \eta_6$ modifiziert.

Die Werte $i_{\text{OL min}}$ und $i_{\text{OL max}}$ sind der kleinste und der größte derjenigen Fuzzy-Indizes, aus denen der Mittelwert i_{OL} gebildet worden ist. An diesen Werten kann die Schwankungsbreite der Fuzzy-Indizes während der Mittelwertbildung abgelesen werden. Wenn z. B. $i_{\text{OL min}}$ und $i_{\text{OL max}}$ stark unterschiedlich sind, so zeigt dies an, daß während der Mittelwertbildung große Schwankungen der Fuzzy-Indizes aufgetreten sind. Der Zellenwirkungsgrad η_{OL} läßt sich dann einer bestimmten Stelle der Kennlinie nicht sinnvoll zuordnen. Daher wird in diesem Falle die Kennlinie nicht adaptiert.

Das Online-Training adaptiert das Fuzzy-System beim Betrieb der Anlage automatisch an das jeweilige Anlagenverhalten. Aufgrund dieser Funktion ist es nicht notwendig, das Fuzzy-System bei der Inbetriebsetzung manuell exakt einzustellen. Es ist ausreichend, das Fuzzy-System vorab grob einzustellen, wobei allerdings ein sinnvoller Anlagenbetrieb möglich sein muß. Anschließend übernimmt das Online-Training die Feineinstellung. Dadurch wird das Fuzzy-System kontinuierlich verbessert, so daß es sich immer mehr dem tatsächlichen Anlagenverhalten anpaßt. Auf diese Weise wird das Fuzzy-System in die Lage versetzt, stets ei-

nen optimalen Zellenwirkungsgrad zu bestimmen.

Durch den Einsatz des Online-Trainings ergeben sich folgende Vorteile:

- Das Fuzzy-System paßt sich einer neuen Anlage automatisch an. Dadurch entfällt bei der Inbetriebsetzung eine zeit- und kostenintensive manuelle Einstellung des Fuzzy-Systems.
- Bei Umbaumaßnahmen in einer Anlage kann sich das Anlagenverhalten ändern. Das Fuzzy-System wird dann automatisch neu eingestellt. Eine manuelle Neueinstellung ist nicht notwendig.
- Beim Betrieb einer Anlage können sich langsame Veränderungen des Anlagenverhaltens ergeben (Drift). In diesen Fällen wird das Fuzzy-System automatisch nachgeführt.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Beschichten eines Metallbandes mit einem Beschichtungsmetall, insbesondere zum Beschichten eines Stahlbandes mit Zink oder einer Zink-Nickel-Verbindung, mittels zumindest einer stromdurchflossenen galvanischen Zelle, die einen Elektrolyten enthält, durch den das Metallband hindurchgeführt wird, wobei der Strom eine Ablagerung einer Schicht von Beschichtungsmetall auf dem Metallband bewirkt, und wobei der Strom u. a. in Abhängigkeit der Eigenschaften der galvanischen Zelle derart eingestellt wird, daß sich eine Schicht einer gewünschten Soll-dicke auf dem Metallband ablagert, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Eigenschaften der galvanischen Zelle (1) mittels eines Fuzzy-Systems (28) ermittelt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Strom u. a. in Abhängigkeit des Wirkungsgrades (η_{cells}) der galvanischen Zelle (1) eingestellt wird, wobei der Wirkungsgrad (η_{cells}) der galvanischen Zelle (1) mittels des Fuzzy-Systems (28) ermittelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Fuzzy-System (28), insbesondere durch Online-Training (29), an die Eigenschaften bzw. den Wirkungsgrad (η_{cells}) der galvanischen Zelle (1) adaptiert wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß bei Verwendung eines neuen Bandes, eines neuen Beschichtungsmaterials oder einer anderen Sollschichtdicke (G_{mean}^* , G_{min}^*) mit einem vorgegebenen Wert (η_{Level2}) für die Eigenschaften bzw. den Wirkungsgrad (η_{cells}) der galvanischen Zelle (1) zur Berechnung des Stroms begonnen wird und daß dieser Wert bei Durchlauf des Bandes durch die galvanische Zelle (1) mittels des Fuzzy-Systems (28) an die tatsächlichen Eigenschaften bzw. den tatsächlichen Wirkungsgrad der galvanischen Zelle (1) angepaßt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 2, 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Wirkungsgrad (η_{cells}) in Abhängigkeit zumindest einer der Größen Stromdichte (I) der Anoden, pH-Wert (W_{pH}) des Elektrolyten und Temperatur (T) des Elektrolyten ermittelt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Wirkungsgrad (η_{cells}) der galvanischen Zelle (1) in Abhängigkeit der Stromdichte (I) ihrer Anoden, des pH-Wertes (W_{pH}) des Elektrolyten und der Temperatur (T) des Elektrolyten berechnet wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 6, da-

durch gekennzeichnet, daß das Online-Training (29) des Fuzzy-Systems (28) in Abhängigkeit des vom Fuzzy-System (28) ermittelten Zellenwirkungsgrades (η_{cells}), des Beschichtungssollwertes (G^*_{mean}), des Beschichtungsistwertes und/oder des mittleren Beschichtungsistwertes (G_{mean}) erfolgt.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Online-Training (29) des Fuzzy-Systems (28) in Abhängigkeit des Stromes durch die galvanische Zelle (1) oder einer äquivalenten Größe, wie z. B. der Stelleingriff (k_{control}) einer Stromregelung, erfolgt.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Online-Training (29) des Fuzzy-Systems (28) in Abhängigkeit zumindest einer der Ausgangsgrößen (η_{Fuzzy} , i_{Fuzzy}) des Fuzzy-Systems (28) erfolgt.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß das Fuzzy-System (28) eine Zwischengröße (i_{Fuzzy}) ermittelt, aus der mittels einer Kennlinie (51) der Wirkungsgrad (η_{Fuzzy}) der galvanischen Zelle (1) berechnet wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Strom (i_{total}) in Abhängigkeit zumindest einer der Größen Beschichtungssollwert (G^*_{mean}), Bandbreite (b_{strip}), Bandgeschwindigkeit (v_{strip}), Ablagerungsäquivalent (c_s), Wirkungsgrad (η_{cells}) der galvanischen Zelle oder Stelleingriff (k_{control}) der Stromregelung erfolgt.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Strom (i_{total}) in Abhängigkeit der Größen Beschichtungssollwert (G^*_{mean}), Bandbreite (b_{strip}), Bandgeschwindigkeit (v_{strip}), Ablagerungsäquivalent (c_s), Wirkungsgrad (η_{cells}) der galvanischen Zelle oder Stelleingriff (k_{control}) der Stromregelung erfolgt.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnung des Gesamtstroms (i_{total}) gemäß dem Zusammenhang

$$I_{\text{total}} = \frac{G^*_{\text{mean}} \cdot b_{\text{strip}} \cdot v_{\text{strip}} \cdot 60}{c_s \cdot \eta_{\text{cells}} \cdot k_{\text{control}}} \quad 40$$

erfolgt, wobei

I_{total} der Gesamtstrom [A] 45

G^*_{mean} der Beschichtungssollwert [g/m²]

b_{strip} die Bandbreite [m]

v_{strip} die Bandgeschwindigkeit [m/min]

c_s das Ablagerungsäquivalent [g/Ah]

η_{cells} der Wirkungsgrad der galvanischen Zelle 50

k_{control} der Stelleingriff der Stromregelung ist.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 11, 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Stelleingriff (k_{control}) der Stromregelung mittels eines sogenannten Monitorreglers ermittelt wird, der ein Modell der Beschichtungsanlage aufweist.

15. Beschichtungsanlage zum Beschichten eines Metallbandes mit einem Beschichtungsmetall, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit zumindest einer Recheneinrichtung und zumindest einer stromdurchflossenen galvanischen Zelle, die einen Elektrolyten enthält, durch den das Metallband durchgeführt wird, wobei der Strom eine Ablagerung einer Schicht von Beschichtungsmetall auf dem Metallband bewirkt, und wobei die Recheneinrichtung den Strom u. a. in Abhängigkeit der Eigenschaften der galvanischen Zelle

derart einstellend ausgebildet ist, daß sich eine Schicht einer gewünschten Dicke auf dem Metallband ablagert, dadurch gekennzeichnet, daß die Recheneinrichtung die Eigenschaften der galvanischen Zelle mittels eines Fuzzy-Systems ermittelnd ausgebildet ist.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

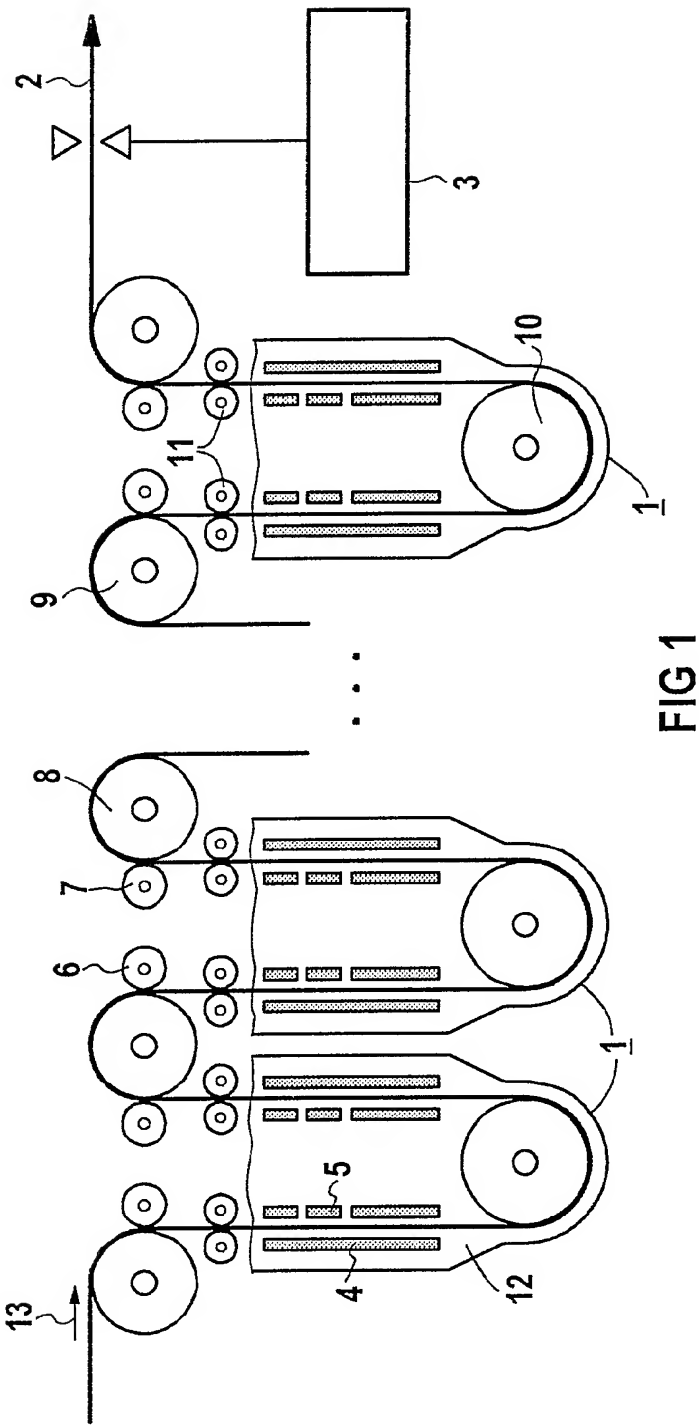


FIG 1

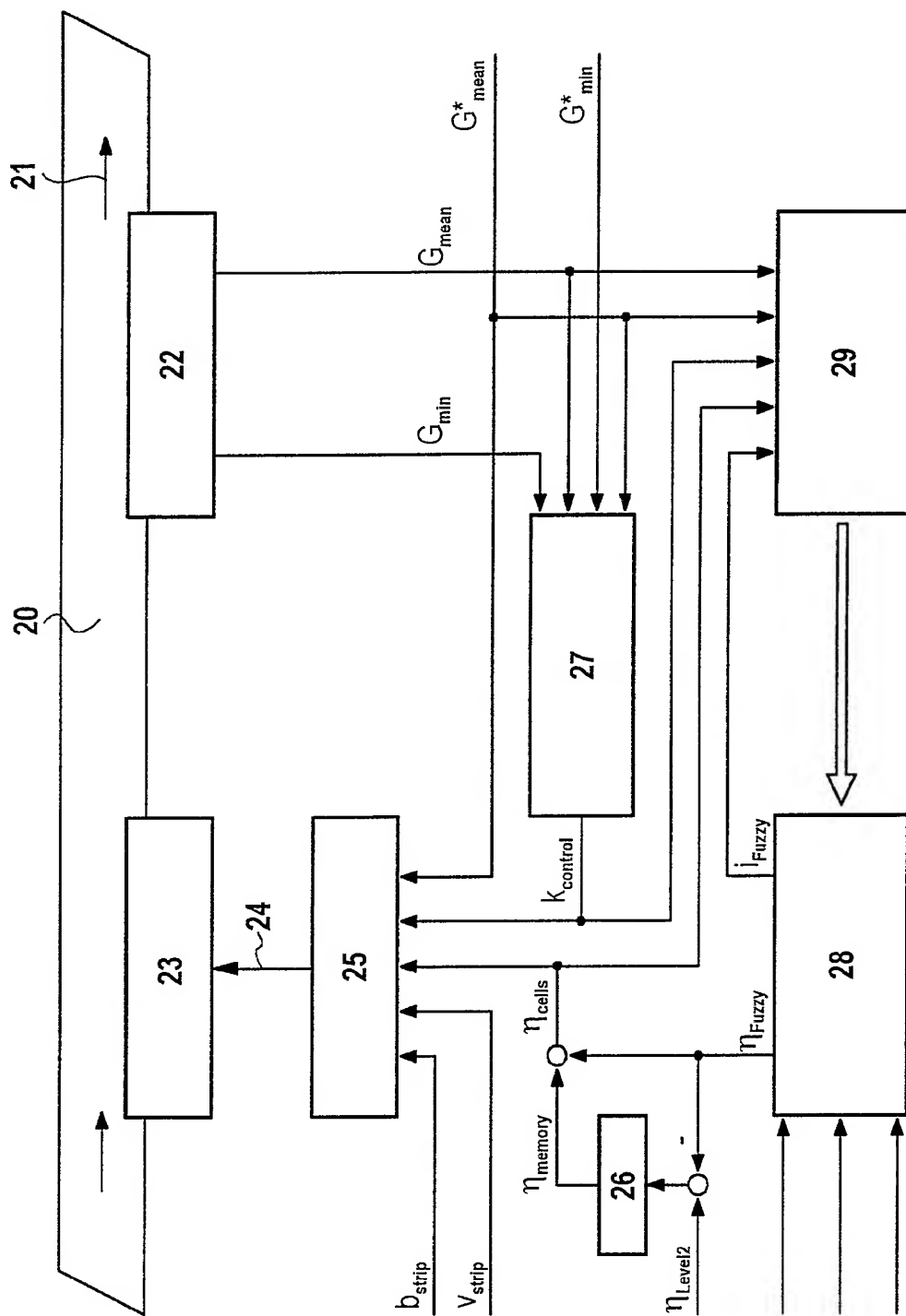


FIG 2

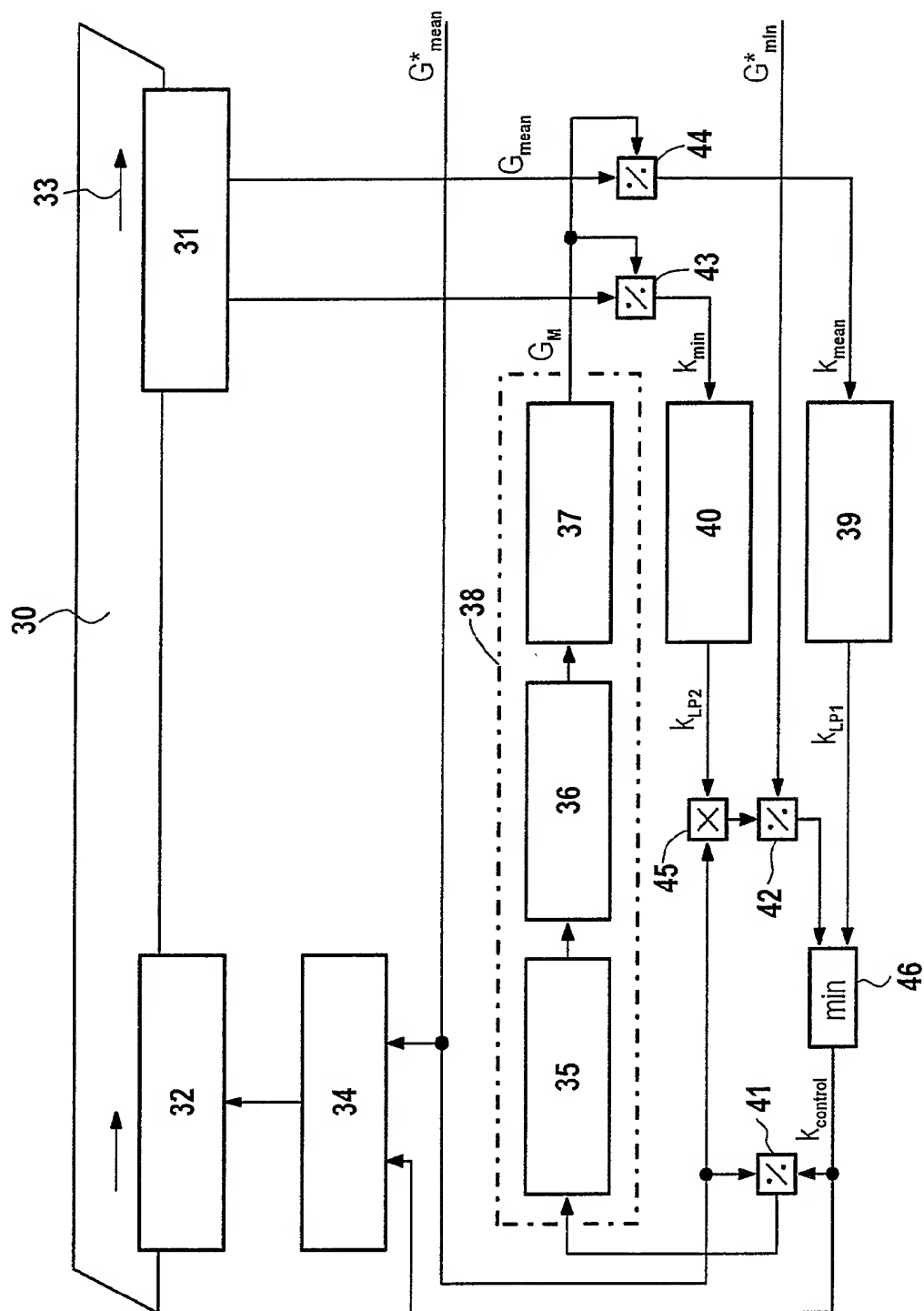


FIG 3

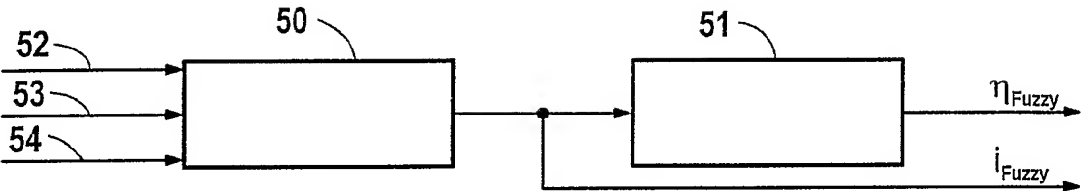


FIG 4

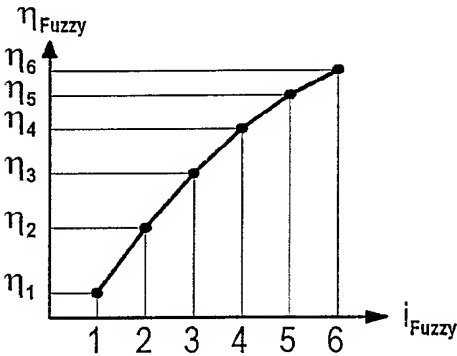


FIG 5

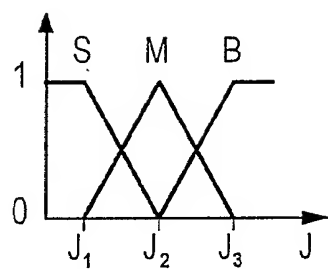


FIG 6

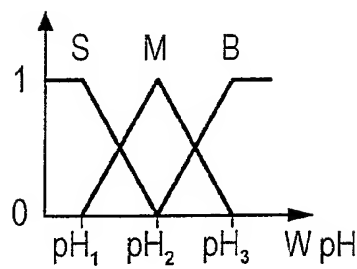


FIG 7

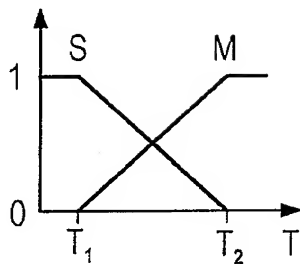


FIG 8

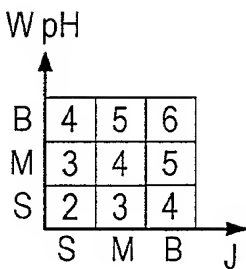


FIG 9

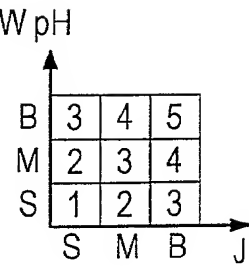


FIG 10

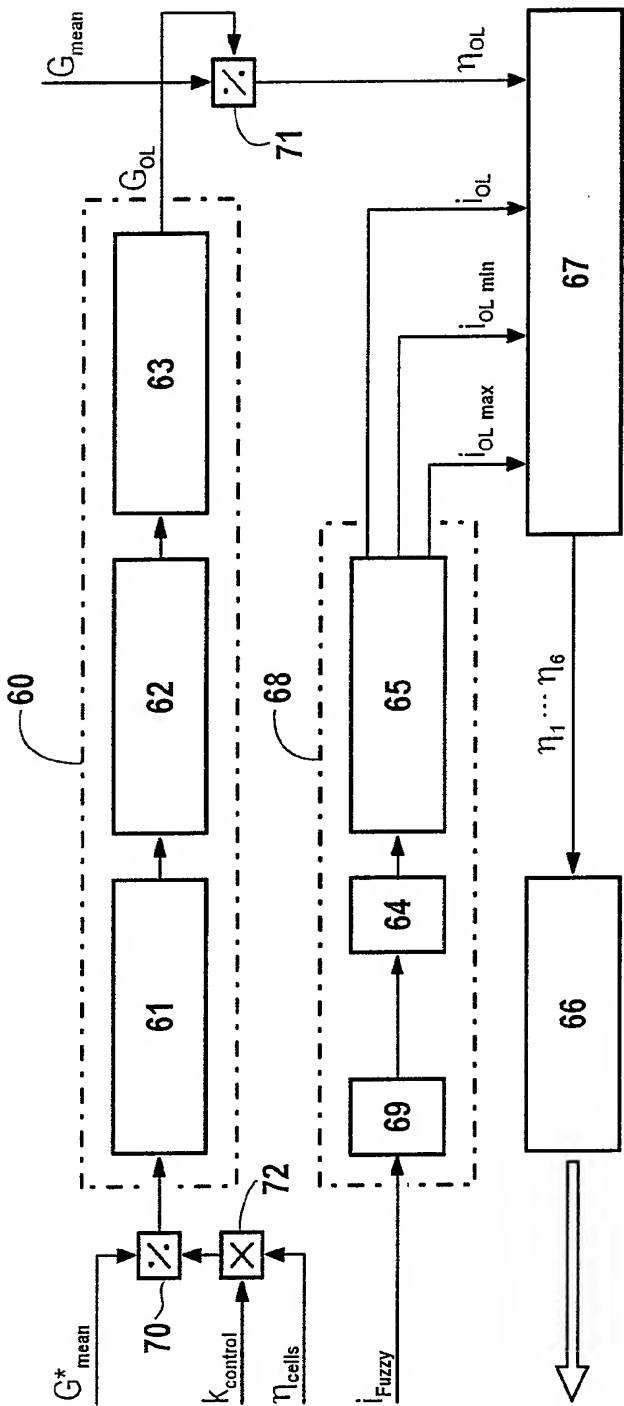


FIG 11